

引用格式:阮军,王心亮,张辉,等. 中国科学院国家授时中心原子喷泉钟研制[J]. 时间频率学报, 2026, 49 (1): 29-39.

中国科学院国家授时中心原子喷泉钟研制

阮军^{1,2}, 王心亮^{1,2}, 张辉^{1,2}, 刘丹丹^{1,2}, 范思晨^{1,2}, 白杨^{1,2}, 管勇^{1,2},
施俊如^{1,2}, 闫露露^{1,2}, 聂帅^{1,2}, 杨少杰^{1,2}, 张首刚^{1,2}

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;
2. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要:原子喷泉钟在国家标准时间和国际原子时产生中起重要作用。阐述了原子喷泉钟的工作原理,理论分析了影响性能的物理机制,分析指出了本地振荡器噪声是限制频率稳定度的主要因素,腔相位分布频移和冷原子碰撞频移是限制频率不确定度的主要因素。在此基础上介绍了中国科学院国家授时中心原子喷泉钟结构特点、工作参数和性能指标,其中铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1 的频率天漂移率位于 -4×10^{-17} 和 7×10^{-17} 之间,自 2022 年 10 月起作为守时钟参与国际原子时的产生;铯原子喷泉钟 NTSC-CsF2 的 B 类频率不确定度为 4.3×10^{-16} ,自 2024 年 4 月起作为基准钟日常驾驭国际原子时。最后介绍了液氮冷却微波腔、低温蓝宝石振荡器和全光纤光学系统等技术研究,旨在进一步提升原子喷泉钟的性能。

关键词:原子喷泉钟;国际原子时;国家标准时间

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2026-01-0029-11

Atom fountain clocks at the National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences

RUAN Jun^{1,2}, WANG Xin-liang^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, LIU Dan-dan^{1,2},
FAN Si-chen^{1,2}, BAI Yang^{1,2}, GUAN Yong^{1,2}, SHI Jun-ru^{1,2}, YAN Lu-lu^{1,2},
NIE Shuai^{1,2}, YANG Shao-jie^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

Abstract: Atomic fountain clocks play a crucial role in the generation of national standard time and International Atomic Time (TAI). This paper describes the principle of atomic fountain clocks and theoretically analyzes the physical mechanisms affecting their performance. The analysis indicates that local oscillator noise is the primary factor limiting frequency in stability, while cavity phase distribution frequency shift and cold collision frequency shift are the main constraint on frequency uncertainty. On this basis, the structural characteristics, operational parameters, and performance of the atomic fountain clocks at the National Time Service Center (NTSC) of Chinese Academy of Sciences are introduced. The rubidium atomic fountain clock NTSC-RbF1 exhibits a fractional frequency drift per day between -4×10^{-17} and 7×10^{-17} , and has served as a timekeeping clock contributing to TAI since October 2022. The cesium atomic

收稿日期:2025-08-10;接受日期:2025-10-08

基金项目:国家自然科学基金(1217304);中国科学院科研仪器设备研制项目(PHYQ2025TD0014)

作者简介:阮军,男,博士,研究员,主要从事原子钟物理及技术研究。

fountain clock NTSC-CsF₂ achieves a type B frequency uncertainty of 4.3×10^{-16} and has been routinely steering TAI (international atomic time) as a primary frequency standard since April 2024. Finally, technological advancements aimed at further improving atomic fountain clock performance are discussed, including liquid nitrogen-cooled microwave cavities, cryogenic sapphire oscillators, and all-fiber optical systems.

Keywords: fountain clock; international atomic time; national standard time

标准时间由守时型原子钟和基准型原子钟共同产生。守时型原子钟输出连续、稳定的时频信号构建时间尺度,单一原子钟存在失效风险,通常利用多台不同种类的原子钟组成钟组以保持时间信号的持续可靠,但是,每台守时原子钟因物理特性差异导致频率存在偏差,需要基准型原子钟来进行标校,将其统一至国际单位制(SI)“秒”的定义上,从而生成既稳定又准确的原子时尺度^[1-3]。

原子喷泉钟以 μK 量级的冷原子团作为鉴频介质,原子团在上升、下落过程中两次与微波场发生作用,延长了原子与微波场的相互作用时间至 0.5 s 以上,并且抵消了腔相位频移和一阶多普勒效应,其频率稳定度和频率不确定度比铯束原子钟高一个量级以上,在各国标准时间和国际原子时产生中发挥重要作用^[4-22]。

中国科学院国家授时中心承担着国家标准时间产生和发播任务,开展了原子喷泉钟的关键技术研究和装置研制。本文首先阐述了原子喷泉钟的工作原理;在此基础上介绍了中国科学院国家授时中心基准型铯原子喷泉钟和守时型铷原子喷泉钟的研制情况,对两台原子喷泉钟的性能指标和运行状态进行总结和分析;最后,介绍了可提升原子喷泉钟性能的液氮冷却微波腔、低温蓝宝石振荡器和全光纤光学系统的研制情况。

1 原子喷泉钟的工作原理

原子喷泉钟以抛射的冷原子粘团为工作介质,在上升、下落过程中两次与微波相互作用获得 Ramsey 鉴频信号,通过伺服控制本振获得钟信号输出。具体的工作过程如图 1 所示,原子喷泉钟按照设定的时序周期性运行,通过磁光阱或光学粘团方式对原子进行冷却获得冷原子团(冷却阶段),冷原子在上抛的过程中被进一步冷却(上抛、后冷却阶段),与选态腔中的微波场作用,筛选出对磁场不敏感的量子态的原子(选态阶段),上升的冷原子粘

团在与馈入到激励腔的钟跃迁微波场作用后继续上升,在自由下落过程中再次通过激励腔与微波场相互作用,实现 Ramsey 方式的跃迁(激励阶段),原子的跃迁几率通过荧光探测法获得(检测阶段)。一个完整的喷泉钟周期包括上述的冷却→上抛→后冷却→选态→激励→检测过程,利用最终获得的跃迁几率信号,使本地振荡器锁定在原子的超精细能级上,实现钟信号输出。原子喷泉钟一次完整的工作过程如图 1 所示。具体工作过程如下。

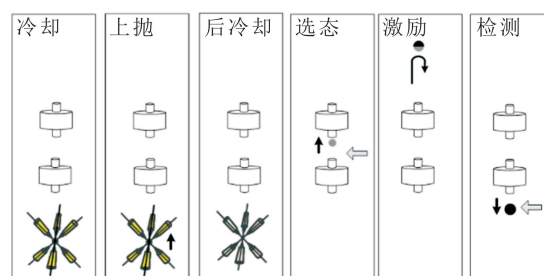


图 1 铯原子喷泉钟的工作过程

① 冷却阶段。在这一阶段,通过磁光阱技术或光学粘团技术降低原子的热运动速度,获得低温的冷原子团。原子处于超高真空的真空状态下,以气体状态弥散在真空腔体内,六束调谐到负失谐于循环跃迁约 10 MHz 的圆偏振 $\sigma^+ - \sigma^-$ 组态的激光交汇在汽室中心,在自发辐射力的作用下冷却、囚禁原子。每束激光的平均光强为铯原子饱和光强的 4~5 倍,科研人员同时施加了功率较弱的抽运光,保证冷却过程的持续进行。通过改变磁光阱或光学粘团作用的时间,可以获得 $10^5 \sim 10^8$ 量级的冷原子团。

② 上抛阶段。原子团样品在六束激光作用下处于静止状态,这时,在 1 ms 的时间内同步改变上下各三束激光的频率约 3 MHz,原子团样品获得向上运动的初速度,形成约 90 cm 高的原子喷泉。

③ 后冷却阶段。原子粘团在上抛阶段的温度仍然过高,热运动膨胀激烈,能够回落的原子样品过少。为了获得更低温度的原子样品,通过偏振梯

度冷却,把原子粘团降到更低的温度。在上抛阶段结束后,紧接着在约 1.5 ms 的时间里把激光失谐量从原来的 -10 MHz 变为 -100 MHz,光强依照指数的规律衰减至零,使原子样品能够降低到低于 2 μ K 的温度。

④ 选态阶段。这个阶段的作用是把对磁场不敏感 $|m_F=0\rangle$ 态的原子筛选出来。后冷却阶段结束以后,原子虽然获得了向上的初速度,但是大部分的原子仍然处在六束激光的交汇区内,而此时冷却激光的光强已经减小至 0,但是抽运激光依然与原子团发生作用,使所有原子被抽运到钟跃迁高能级上,其中磁量子数为 0 的原子经过选态微波场后跃迁到低能级上,剩余未跃迁的高能级原子经一束谐振激光照射后偏离竖直运动方向,实现了 0 态原子的选择。

⑤ 激励阶段。经过选态阶段后,仅有磁量子数为 0 的原子到达微波腔,受到激励腔中的微波场作用发生能级跃迁。随后,原子样品继续上升至最高点,在重力的作用下再次受到激励腔的微波场作用,完成一次完整的 Ramsey 跃迁过程。

⑥ 检测阶段。原子样品经微波场的 Ramsey 作用下,发生钟跃迁能级的跃迁,跃迁几率的大小与微波频率和原子谐振频率的差值有关,该差值(又称失谐量)越大,其跃迁几率越小,反之则越大,如图 2 所示。利用该跃迁几率值就能够获得原子喷泉的伺服控制信号,从而完成钟的闭环锁定。

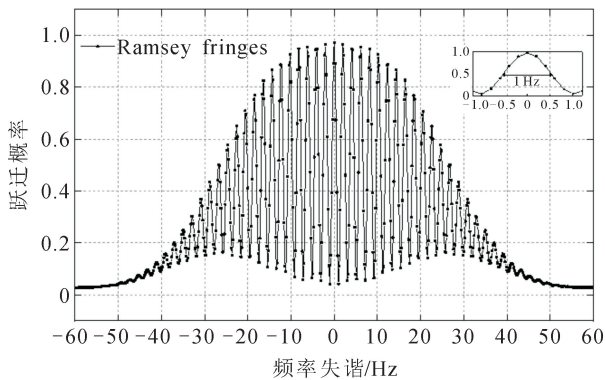


图 2 原子喷泉钟鉴频信号

1.1 频率稳定度

原子喷泉钟的频率稳定度由式(1)表示^[23]:

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{at}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \left(\frac{1}{N_{at}} + \frac{1}{N_{at} \epsilon n_{ph}} + \frac{2\sigma_{\delta N}^2}{N_{at}^2} + \gamma \right)^{1/2}. \quad (1)$$

式(1)中,等号右边括号内分别表示量子投射噪声、探测光散粒噪声、原子数目起伏和本地振荡器相位噪声的影响。

提高稳定度性能可通过增加冷原子数目来实现。慢速原子束制备光学粘团技术可以达到这一目的,比如法国 FO2^[24]、德国 PTB CSF2^[25] 和国家授时中心 NTSC-CsF2^[26] 都采用慢速原子束装载光学粘团的方法减小“Dick 效应”的影响,其稳定度性能获得相应的提高;中国计量院采用两级原子喷泉技术提升了冷原子数目^[27];英国国家物理实验室^[28],加拿大研究委员会^[9]通过量子态制备方法,减小了传统选态方法导致的损耗,提升了原子数目。

原子喷泉钟的稳定度性能除了与探测原子数有关外,还与本地振荡器的相位噪声有很大关系。实验表明,在检测原子数大于 2×10^4 、每个原子发出光子数大于 150、荧光收集效率较好大于 10% 的情况下,式(1)等号右边括号内前三项的不稳定度可以忽略。Dick 效应就成为影响原子喷泉钟的主要来源。

通过降低本地振荡器的相位噪声和缩短喷泉钟运行周期的“Dead Time”可以降低 Dick 效应的影响,对于改善喷泉钟稳定度性能具有重要的作用。降低本地振荡器的噪声可以采用液氮冷却的蓝宝石振荡器来实现,这种振荡器具有超低的相位噪声,巴黎天文台的喷泉钟频率稳定度性能为 $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,达到了量子噪声极限^[29-30]。利用飞秒光梳将超稳激光的频率稳定度指标下转换为微波频率是另一种方法,法国 OP^[31]、德国 PTB^[32] 实现了通过飞秒光梳锁定到超稳激光器上,短期稳定度达到了 10^{-14} 量级。

1.2 频率不确定度

从原子喷泉钟的工作原理可以看出,喷泉钟以冷原子样品为鉴频介质,通过原子样品上抛、自由下落两次与微波场相互作用的方式获得误差控制信号,伺服控制晶体振荡器信号的频率到冷原子样品的谐振频率上。冷原子样品的谐振频率与“秒”单位定义的频率值并不相等,在外部环境(如引力场、电磁场等)作用下、内部原子相互作用下(如碰撞),原子样品的跃迁频率偏离了定义值,这些偏离量称为“频移”。对铯原子喷泉钟进行评定,需要全面研究所有可能的干扰效应和频移机制,理论上对各种频移项估算、实验上测量,其测量的不确定度

反映了对频移机制的认识深度和实验测试水平。

1) 腔相位分布频移

腔相位分布频移的物理本质是残余的多普勒频移^[33-38]。运动的原子和微波场作用会产生多普勒频移,但在喷泉钟里由于原子回落速度与上升速度方向相反,多普勒频移会大部分抵消,然而由于原子团空间分布不均匀和速度分布的不平衡导致原子上升回落经历不同的过程,还会残余一部分多普勒频移。在 Ramsey 激励作用下,频移量与原子感受到的微波场相位成正比。对于理想的驻波,空间各点相位是一致的,但对于实际有能量损耗的微波腔,微波就不再是理想的驻波了,存在一定的行波分量,其相位随空间位置存在梯度分布。对于喷泉钟采用的圆柱形微波腔,微波场的磁场部分描述为理想状况下的 $H_0(\vec{r})$ 与能量消耗产生的微扰 $g(\vec{r})$,腔中微波可描述为^[35]

$$H(\vec{r}) = H_0(r) + \sum_m \left(\frac{\Delta\omega}{\Gamma} + i \right) g_m(r, z) \cos(m\theta). \quad (2)$$

式(2)中, $\Delta\omega$ 为微波腔的谐振频率与原子谐振频率的失谐量, Γ 为微波腔的半高宽。微波腔中的相位可以表示为 $\Phi \approx -g_z(\vec{r})/H_{0z}(\vec{r})$ 。由于原子在 z 方向运动,所以相位差主要体现在水平方向的位置不同。在 r 趋近 0 时, $g_m(r)$ 近似正比于 r^m 。由于高次项快速衰减,因此在实验中仅需考虑 $m=0, 1, 2$ 三项。 $m=0$ 分量表示由于谐振腔腔壁和端盖的吸收效应引起的谐振腔径向的相位不对称,这种情况下纵向的相位变化大于横向,在最优 $\pi/2$ 脉冲功率下,这项频移可以忽略^[34]。 $m=2$ 分量表示原子团偏离腔轴而且水平面的能级检测不平衡情况下产生的频移,把探测光方向与微波馈入方向设置为 45° 夹角,可以有效消除该项频移^[34]。 $m=1$ 分量表示由腔中微波双端馈入的不对称和微波腔腔壁的能量损失产生的频移。当原子团行进的路径与重力方向不重合或偏离谐振腔轴线时,这项频移将被放大,相对频移量为

$$\Delta\nu_{\text{DCP}}/\nu_{\text{hfs}} = \alpha\theta. \quad (3)$$

式(3)中, α 是由谐振腔倾角引起频移的斜率, θ 是谐振腔的倾角。实验上调整谐振腔的倾角,测量谐振腔单端馈入和双端馈入或两个单端馈入的频差,测得 α 值,并将 θ 值调整为零,腔相移的不确定度由倾角的调整精度和倾角的变化范围决定。

由式(3)可知,腔相位分布频移不确定度由 $\alpha\theta$

的不确定度确定,前者取决于喷泉钟的频率稳定度,后者需要精确测量原子喷泉钟的飞行角度。加拿大国家研究委员会 NRC^[39] 利用光生微波源提升了频率稳定度,采用激光吸收成像法精确确定了原子喷泉钟的角度,把这一项频率不确定度降低至 0.4×10^{-16} 。

2) 冷原子碰撞频移

铯原子喷泉钟的工作介质是冷原子 (μK 量级),此时原子之间的碰撞表现出显著的量子效应。量子散射理论表明,冷原子因为碰撞发生出现自旋状态交换导致量子态发生改变,能级出现微小移动,从而导致原子跃迁频率的变化。冷原子碰撞引起的频率扰动,是限制铯喷泉钟不确定度提高的主要系统误差。冷原子的此项频移与冷原子团的密度成正比,如何制备不同密度的原子粘团,同时不改变影响频移的其他因素,是准确测量冷原子碰撞频移的关键技术。当原子被冷却至 μK 量级时,原子的德布罗意波变长,表现出显著的量子效应。通常,频移量的大小与原子样品的密度成正比,其不确定度来源于差分法测量的统计不确定度和非线性引起的系统不确定度。降低不确定度通常有以下 3 种方法。

① 降低原子团密度。虽然这种方法会引起短期频率稳定度降低,但是可以通过延长喷泉钟工作时间来降低总的统计不确定度。美国国家标准与技术研究院 NIST^[17]、意大利计量院 IEN^[5]、中国计量研究院 NIM^[7,27] 采用了这一方法,原子样品直接从汽室中用光学粘团获得,冷原子碰撞频移的系统不确定度为 $(3.4 \sim 1.7) \times 10^{-16}$ 。

② 降低原子团的直径。英国物理研究院 NPL^[28]、加拿大国家研究委员会 NRC^[39] 从理论和实验表明了当上抛的原子团直径小于 1 mm 时,这时处于不同量子态的原子具有相反的碰撞系数,原子碰撞频移为零。可以通过 MOT 方式短时间装载原子样品的方式来实现,由于装载时间短,原子数目较小,同样需要喷泉钟运行较长时间来获得较低的统计不确定度,冷原子碰撞频移不确定度达到 0.39×10^{-16} 。

③ 降低原子团比例的不确定度。德国物理与技术研究院 PTB^[40]、法国巴黎天文台 OP^[41] 采用绝热跃迁方法来精确制备原子数目成严格比例关系的样品,差分计算后的冷原子碰撞频移可以实现较低的系统不确定度,并同时保持上抛较大数目的原

子样品实现较低的统计不确定度,冷原子碰撞频移不确定度达到 0.4×10^{-16} 。

2 基准型铯原子喷泉钟 NTSC-CsF2

铯原子喷泉钟是复现时间单位“秒”的基准装置,中国科学院国家授时中心研制了铯原子喷泉钟 NTSC-CsF2,由物理系统、光学系统、微波频率综合系统和控制系统组成,如图 3 所示。



图 3 铯原子喷泉钟 NTSC-CsF2

物理系统包括 2D-MOT 真空腔、3D-MOT 真空腔、选态腔、探测腔、谐振腔、C 场和磁屏蔽。2D-MOT 真空腔是由钛合金加工而成的长方体,长方体的四个侧面开有长方形窗口用于打入冷却光和反抽运光。每一个侧面都安装一组长方形通电线圈。四组通电线圈在 2D-MOT 阱区产生径向的梯度磁场,沿 2D-MOT 真空腔轴向磁场梯度为 0。2D-MOT 腔体的后侧面设计圆形通光孔用于打入推光,以增大冷原子束的通量。2D-MOT 腔体的前端开有直径为 1.5 mm 的小孔,用于慢速原子飞入 3D-MOT 真空腔,同时保持两个腔体之间 2~3 个量级的压强差。

3D-MOT 真空腔是由整块钛合金加工而成的 14 面体。金属腔体上的所有通光窗口与观测窗口均用玻璃压钢丝密封。真空腔的上下两部分各有三个通光窗口用于打入冷却光,六束冷却光呈“1, 1, 1”组态设置。3D-MOT 连接 55 L/s 的钛离子泵用于获得 2×10^{-7} Pa 的真空。3D-MOT 真空腔以及与其相连的真空管道内壁涂吸光剂以消除光频移。

3D-MOT 上方是圆柱体结构的选态腔,圆柱的直径和高度都是 4.3 cm。选态腔对工作模式的要求不高, Q 值(品质因数)为 2 000 左右,谐振频率与原子跃迁频率的偏差小于 2 MHz 即能满足要求。选态腔的微波馈入选用环形天线耦合的方式,耦合环紧靠选态腔内侧壁,耦合环平面与选态腔轴线平行。为防止微波泄漏,选态腔的上下端盖分别设计

截止波导。选态腔外表面设置一对凹槽用于缠绕线圈以产生选态 C 场。

探测腔位于选态腔上方,采用上下分离的方式实现双能级探测,探测腔相对的两个侧面设计为跑道形窗口,两个直径为 35 mm 的通光孔用来进行荧光收集。另外两个侧面设计为矩形窗口,三个竖直排列的通光孔分别用于打入两束探测光、一束推光和一束反抽运光。为了消除 $m=2$ 项腔相位频移,探测光的打入方向与谐振腔微波馈入方向呈 45° 夹角。

谐振腔是原子与微波作用的场所。设计谐振腔的 Q 值为 12 000,谐振腔采用无磁性、高电导率的无氧铜加工而成。谐振腔采用双端波导对称馈入的方式减小相位频移。端盖与腔体、矩形波导与腔体的接缝处压钢丝密封。为了防止谐振腔中与 TE₀₁₁ 模简并的 TM₁₁₁ 模起振,设计端盖的直径比腔体内径小 1.0 mm,以切断 TM₁₁₁ 模的磁场。谐振腔外围安装钛合金筒构成原子自由漂移区,区内均匀布置 3 个校准的铂电阻用于测量自由漂移区温度。

自由漂移区外围设置 C 场线圈,采用双线是为了消除单根导线经过螺线管侧面时在中心产生的径向磁场。螺线管外面装有四层磁屏蔽,最内层磁屏蔽端盖紧靠螺线管两端,以实现喷泉管轴向 48 cm 范围内磁场起伏小于 $2 \text{ nT}^{[42]}$ 。

光学系统中冷却、俘获和探测光由 50 mW 的外腔半导体激光器和锥形放大器提供。锥形放大器出射光经光纤输出最大功率为 900 mW,通过偏振分束器和半波片后分为六束空间光。每束激光双次通过 AOM(acousto-optic modulator)后频率红移并输入保偏光纤。一束约 300 mW 的光用作 2D-MOT 冷却光使用;一束约 20 mW 的光用作 2D-MOT 推光使用;两束光每束约 200 mW 用作 3D-MOT 冷却光使用;一束约 80 mW 的光用作探测光;一束约 80 mW 的光用作选态和探测的推光。反抽运光选用 DL100 光栅外腔半导体激光器,激光器输出的总功率为 60 mW。整个光学系统的光纤输出和耦合效率优于 70%。每个光纤耦合器的前端都设有机械开关用于每路光的物理关断。光学系统一次锁定后运行时间可以超过 1 个月,运行期间激光器总功率变化小于 3%。

微波频率综合系统以氢钟提供的 100 MHz 频率信号为参考通过锁相介质振荡器、单边带混频

器、直接数字合成器,转换获得 9 192 631 770 Hz 信号。各微波器件之间采用半刚电缆进行连接,保证了微波信号的高质量传输。9 192 631 770 Hz 微波信号通过功分器分为两路分别输入谐振腔的两个端口。一路设置移相器用于两端微波的相位调整,另一路设置衰减器用于两端微波的功率调整。移相器是 10 位数字控制,可实现 360° 相位调整。为了在腔相移测量时实现两路微波信号的独立关断,在每路分支中都设置了微波开关,开关处于关断状态时的隔离度为 80 dB。

喷泉钟物理系统、光学系统、微波频率综合系统在计算机的操控下,完成原子的俘获、上抛、选态、激励、探测等过程。NTSC-Cs2 的运行周期为 2 s,铯原子经 2D-MOT 与 3D-MOT,通过磁光阱技术实现了对原子的冷却与囚禁。当冷原子团中的原子数目达到 10^8 量级,关断 2D-MOT 推光以及 3D-MOT 磁场,冷原子团在 3D-MOT 中心处转化为光学粘团。自由扩散 50 ms 之后,改变 3D-MOT 下、上两组冷却光的频率失谐量 ± 2.8 MHz,冷原子粘团开始上抛。上抛 1.5 ms 之后,将 3D-MOT 上下两组冷却光的频率失谐量增大 60 MHz,同时减小光功率,通过偏振梯度冷却将原子温度降到 $5 \mu\text{K}$ 。再经 2 ms 后关断 3D-MOT 冷却光,反抽运光延迟 1 ms 关断,实现上抛的原子全部抽运到 $F=4$ 态。进入选态阶段后,打开选态推光,经 80 ms 选态结束,关闭选态推光。冷原子团继续上行进入微波谐振腔,与微波场发生 Ramsey 相互作用。为了防止光频移,冷原子团在谐振腔及自由漂移区飞行时间段内,所有的激光保持关闭状态。原子下落离开谐振腔后,打开探测光、探测推光和反抽运光,分别对 $F=3$ 和 $F=4$ 态原子的荧光信号进行采集与测量。每个周期的频率修正量都累加到频率综合系统的中心频率上以供下一个周期输出。记录每一周期的频率修正量用于计算频率稳定性和氢钟的漂移。

NTSC-CsF2 喷泉钟的秒级频率稳定度为 2×10^{-13} , A 类频率不确定度为 4.4×10^{-16} , B 类频率不确定度为 4.3×10^{-16} 。由国际计量局时间频率咨询委员会频率基准工作组对铯原子喷泉钟的运行状态、性能指标和比对结果开展了讨论和评估,自 2024 年 4 月起 NTSC-CsF2 参与校准国际原子时,相关频率数据每月定期发布在时间公报 Circular T。图 4 为各国铯原子喷泉钟一年多来与国际单位

制 SI“秒”对比结果,NTSC-CsF2 每月报送的频率数据均在自评定的不确定度内,与各国喷泉钟的偏差符合较好。

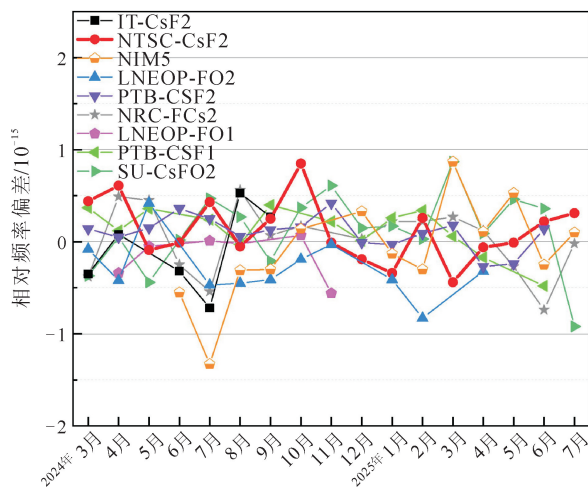


图 4 各国铯原子喷泉钟与时间单位“秒”对比
(数据源自 BIPM《时间公报》)

3 守时型铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1

守时型铷原子喷泉钟具有极低的频率漂移率,展现出了优异的长期频率稳定度,是一种新型的守时原子钟。

中国科学院国家授时中心研制的守时型铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1 物理系统提供 ^{87}Rb 原子与激光、微波相互作用的高真空、磁场与温度恒定的物理环境。铷原子喷泉钟的物理系统从下往上的主体部分依次是底部五通、下探测区、MOT(磁光阱),选态腔、上探测区、激励腔、自由飞行区以及上离子泵。底部五通连接有 45L 离子泵、1 个吸气剂泵、石墨管以及外部分子泵接口,真空度优于 2×10^{-8} Pa。下探测区用于原子上抛之前实验参数的优化。MOT 腔是一个正十四面体的钛腔,为了实现(1,1,1)方式的上抛。MOT 腔的机械形位公差为 0.03 mm,角度公差为 $0.5'$,以此来满足 MOT 对六束冷却光方向性的要求。MOT 腔上有六个直径为 35 mm 的通光孔供六束冷却光使用。选态腔采用的是高度 54.61 mm、直径 83.27 mm 的钛腔,蓝宝石玻璃直接焊接在腔体上实现真空密封和微波耦合,其 Q 值为 800,在 25.5° 时真空中选态腔的谐振频率与 6 834 682 610 Hz 差距在 1 MHz 以内。探测区底部与顶部都安装有石墨管,用于吸附速度较大的热原子,尽可能减小其对探测结果的影响。激励腔选用标准的 TE011 模式的圆柱型腔, Q 值为 15 800。三层磁屏蔽使得自由飞行区竖直方向的磁

场波动在 ± 1.5 nT 以内。

光学系统提供 ^{87}Rb 喷泉钟冷却、操控以及探测 ^{87}Rb 原子所需的频率、功率及偏振受控的激光。光学系统包括冷却光激光器、重抽运光激光器和光路模块。冷却光激光器和抽运光采用的是 780 nm 光纤激光器。光路模块所有的器件都集成在一个一体化加工的铝制盒内,包括冷却光、重抽运光的调制转移光谱光路。六束冷却光分别双次通过上三束冷却光路与下三束冷却光路中相应的 AOM 实现频率改变,再经过光功率耦合光路耦合进保偏光纤。下三束冷却光、探测光以及选态推光使用的是同一个 AOM,利用高速微波开关的不同输入端口,可以实现不同信号源在不同时间段,输入不同的微波信号进入到 AOM,避免了传统的每一路光需要一个 AOM 的情况,减小了 AOM 的使用量,缩小了空间光路,提高了光学平台的可靠性。上抛与亚多普勒冷却 ^{87}Rb 原子的频率改变是利用 AOM 和冷却光激光器的电流相互配合来完成。亚多普勒冷却阶段的功率变化是通过压控衰减器控制 AOM 的输入信号功率来完成。光学平台上所有激光经过保偏光纤传输到物理系统自研的扩束镜,上、下三束冷却光分别使用耦合效率接近 60% 的分束器。其余的重抽运光、探测光、选态推光分别使用保偏光纤耦合效率在 70% 以上。

^{87}Rb 喷泉钟在时序控制下周期性工作:首先打开磁光阱磁场,俘获原子的时间为 500 ms。通过关闭磁场和冷却光自由下落 31 ms,然后调整上、下三束冷却光的频率实现原子上抛,到达激励腔上方 312 mm 后自由下落于探测区进行光探测,探测光频率相对于 $F = 2$ 至 $F = 3$ 红失谐自然线宽的 50%,功率 15 mW。原子发生跃迁的概率是通过归一化计算原子数 N_2 占总原子数 $(N_1 + N_2)$ 的比例得到,从而得到外部频率与原子跃迁频率的差值,将该差值通过算法伺服反馈给频率综合器和相位微跃计,进而输出标准的频率信号以及秒脉冲。NTSC-RbF1 守时型铷喷泉钟的秒级频率稳定度是 1.9×10^{-13} ,天频率稳定度优于 7×10^{-16} ,天频率漂移率优于 7×10^{-17} 。自 2022 年 4 月开始向国际计量局报送数据,经过前期 6 个月的数据验证,于 2022 年 10 月在国际计量局取得权重,此后至今连续每个月向国际计量局报送数据,取得权重,参与国际标准时间 UTC 的产生。图 5 是铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1 实物图,图 6 是 2022 年 10 月至今,以

UTC 为参考的铷原子喷泉钟天频率漂移率。



图 5 铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1

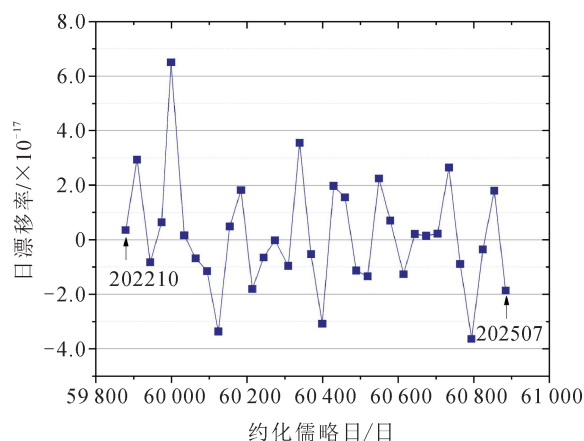


图 6 铷原子喷泉钟漂移率

4 原子喷泉钟的性能提升技术研究

随着原子喷泉钟物理机制的深入研究,可以提升原子钟性能的技术也在不断发展^[43-48],喷泉钟的天稳定和频率不确定度性能有望进入 10^{-17} 量级。

1) 液氮冷却微波腔

为了更大程度地提升频率不确定度性能,国家授时中心继续开展了低温型铯原子喷泉钟的研究,通过液氮冷却方法大幅降低喷泉钟黑体辐射频移不确定度敏感系数和腔 Q 值,进而减小喷泉钟黑体辐射频移、腔相位分布频移不确定度,提升喷泉钟性能。

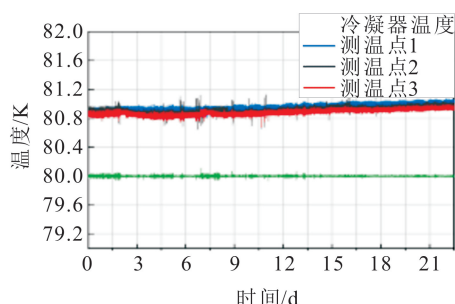
微波谐振腔是低温型铯原子喷泉钟的核心部件。低温谐振腔研究的难点有三个:一是结构设计和材料选择,由于工作在液氮温度下,谐振腔的尺寸会有不同,研制谐振腔的材料、线缆、焊料等都要能够适应低温环境;二是谐振腔调谐方法,低温谐振腔工作于低温超高真空环境中,而其调谐工作只能在室温大气环境中完成,调谐之前要准确测量温度、真空度、湿度变化对谐振频率产生的影响。当温度由 300 K 降低到 77 K 时,铜的电导率增大,趋肤深度约降低为原来的 1/3,无载 Q_0 值将增大为原来的 3 倍。设计的谐振腔直径 $2R = 43$ mm,当

谐振频率为钟跃迁频率 $9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ 时,腔长 $L = 42.94\text{ mm}$,谐振腔在液氮温度时的谐振频率比室温时的谐振频率高 34.03 MHz 。

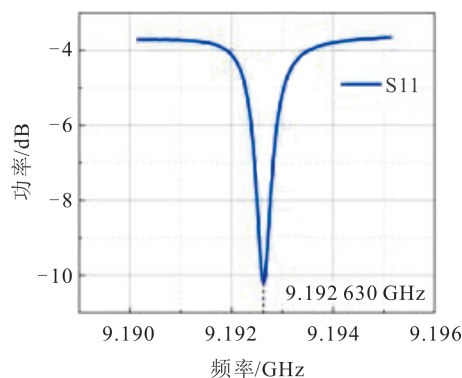
采用矢量网络分析仪透射信号测量微波腔谐振频率,有载 Q 值为 $1\,1000$,将微波腔抽真空至 10^{-5} Pa ,并浸泡在液氮中,得到图 7 所示的结果,此时谐振频率为 $9.192\,641\text{ GHz}$,有载 Q 值为 $15\,000$,无载 Q 值为 $25\,000$ ^[49]。在此液氮真空环境中持续



(a) 低温微波腔



(b) Q 值



(c) 温度稳定性

图 7 研制的低温微波腔, Q 值以及温度稳定性

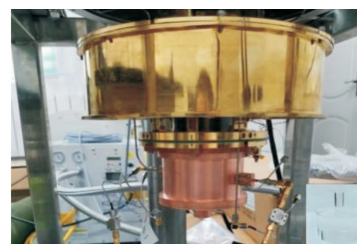
2) 低温蓝宝石振荡器

目前原子喷泉钟的短期频率稳定度受限于本地振荡器的相位噪声。针对未来更高性能的原子喷泉钟,使用低温蓝宝石振荡器作为喷泉钟的本地振荡器使得喷泉钟的秒级频率稳定度进入 10^{-14} 量级,工作在量子投影噪声极限下。

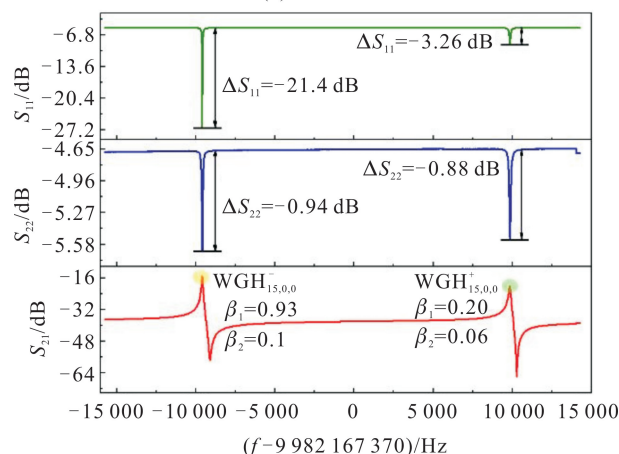
低温蓝宝石振荡器主要由低温恒温器、低温蓝宝石谐振腔、振荡电路和监控系统四部分组成。低温蓝宝石谐振腔是低温蓝宝石振荡器的核心部件。基于径向一轴向模式匹配法,理论分析了谐振频率与谐振体几何尺寸的关系;基于有限元分析仿真了蓝宝石圆柱体内场分布情况;基于近场探测的方法,采用磁环/探针耦合的方式激发蓝宝石谐振体内的回音壁电磁场,测量了谐振体表面的 S 参数,由此确定了谐振体内的回音壁模式参数^[50]。通过二分法调整磁环距蓝宝石腔体的距离,使得低温蓝宝石谐振腔的入射耦合系数应接近于 1,出射耦合系数接近于 0,这样保证了蓝宝石谐振腔作为鉴频器具有最高的鉴频灵敏度,又降低了对幅度调制噪声的敏感度。将温度稳定在 6.98 K ,对蓝宝石谐振腔进行扫频测量腔模式。图 8 是当温度稳定在 6.98 K 下时高阶基模 $\text{WGH}_{15,0,0}^-$ 的 S 参数。蓝宝石腔体是非理想的圆柱体,原本简并的两种极化模式中心频移发生偏移,出现双模态,频率差为

测量 48 h ,未发现腔谐振频率与 Q 值发生明显变化。微波腔谐振频率与钟跃迁频率的微小偏差及温度变换导致的频率变化可以通过调整液氮温度予以补偿。喷泉钟常规运行时信号源输入微波功率约为 -70 dBm ,此时对应的谐振腔泄漏的微波功率小于 -180 dBm ,正常运行时产生的微波泄漏频移应小于 1×10^{-18} ,可以进一步提升原子喷泉钟的性能。

18 kHz ,线宽为百 Hz 量级。



(a) 蓝宝石谐振腔



(b) 谐振回音壁模式散射参数

图 8 蓝宝石谐振腔及其模式

基于 $\text{WGH}_{15,0,0}^-$ 模式的蓝宝石谐振器构成振荡器,并且通过两个伺服环路来控制信号的相位和功率波动,来提高信号的频率稳定和相位噪声性能。

基本振荡环路包括低温蓝宝石谐振腔、低相位噪声放大器、电调移相器、腔体滤波器和隔离器。谐振器用于基本振荡回路的传输模式,在反射模式下作用于经典 POUND 电路的鉴频器,插入损耗为 -15 dB。低噪声微波放大器提供 54 dB 的放大增益,补偿环路损耗,使得注入到谐振腔的微波功率约为 1 mW。通过调节移相器使得环路起振并且使振荡信号功率达到最大。腔体滤波器用于选择 $WGH_{15,0,0}^-$ 模式,中心频率为 9.889 GHz,带宽为 55 MHz。在基本振荡环路的基础上,为了进一步提高频率源的频率稳定度,采用 POUND 电路原理,增加相位控制环路,使微波环路的相位延迟发生改变,使得振荡信号的相位更加稳定。同时,功率伺服控制电路使得注入谐振腔的功率达到稳定,提高了振荡器频率的长期稳定度。

将低温蓝宝石振荡器的输出信号 9.982 GHz 通过 100 分频后和超稳晶振 HSO14 的 10 MHz 进行相互对比,使用 VCH323 相位比对分析仪进行对比。其性能如图 9 所示。用在原子喷泉钟上可以进一步提升喷泉钟的性能。

3) 全光纤光学系统

铷原子喷泉钟作为守时钟,更关注的是其中长期稳定度,光学系统是限制其长期连续运行的关

键。传统自由空间光学系统通过采用分立的光学元件搭建于隔振光学平台上,光学元器件多,光路复杂,其稳定性易受温度波动、湿度变化及机械振动等外部扰动的影响,光束指向偏差通过级联效应被累积放大,其长期稳定性面临显著挑战。美国海军天文台四台正在运行的铷原子喷泉钟,在 4.5 年的运行时间内平均每台钟每年出现 1.5 次频率“跳变”的非稳态行为,可能与人工干预相关。为了解决上述问题,以全光纤光学器件为基础,通过主动扫描激光频率方法,实现了全光纤光学系统,其结构如图 10 所示。

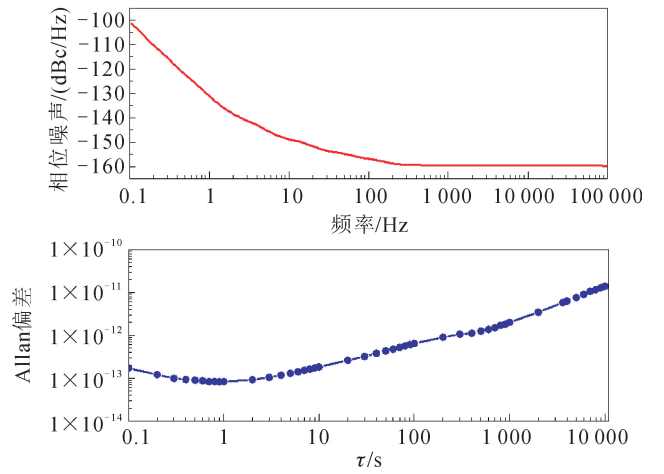


图 9 低温蓝宝石振荡器相位噪声和频率稳定度

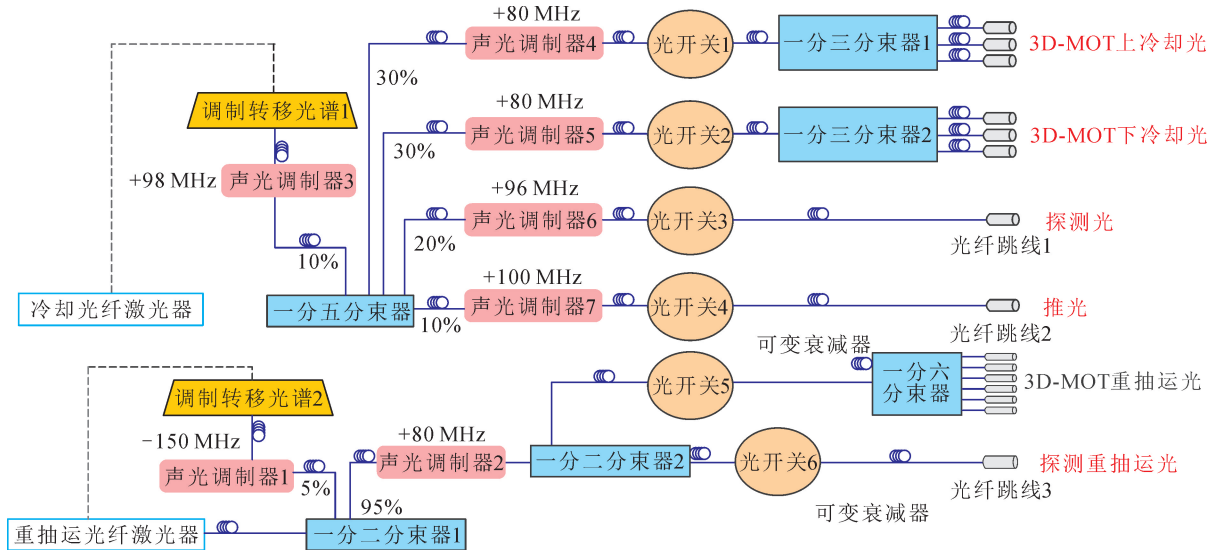


图 10 全光纤光学系统结构图

780 nm 冷却光单频光纤激光器出射的激光首先经过一分五光纤分束器分为五部分,一小部分经过光纤声光调制器 1 进入调制转移光谱装置将冷却激光稳定在 ^{87}Rb 原子 D_2 线 $F=2$ 至 $F'=3$ 的跃迁频率上,另外两大部分通过光纤声光调制器 4 和光纤声光调制器 5 后用两个一分三光纤分束器分别作

为上三束冷却光与下三束冷却光输出。剩余两部分分别经过光纤声光调制器 6 和光纤声光调制器 7 后用保偏光纤分别作为探测光和选态推光输出。在光纤分束器和保偏光纤前熔接有光纤光开关。 780 nm 重抽运光单频光纤激光器出射的激光首先经过一分二光纤分束器分为两部分,一小部分经过

光纤声光调制器 2 进入调制转移光谱装置锁定重抽运激光, 剩余部分经过声光调制器 3 后使重抽运激光稳定在 ^{87}Rb 原子 D_2 线 $F=1$ 至 $F'=0$ 的跃迁频率上。之后通过一分二光纤分束器分为两部分, 其中大部分激光通过一分六保偏光纤分束器作为 3D-MOT 重抽运光输出, 剩余部分用保偏光纤作为探测抽运光输出。

实验测量了光学系统每路输出激光的偏振消光比均大于 24 dB, 72 h 内的功率均方根(RMS)稳定性, 均小于 1.5%。对光学系统中六束冷却光的输出激光功率进行了长达近 100 d 的持续监测, 光学系统 15 d 的功率稳定度为 4×10^{-3} , 天频率稳定度为 7×10^{-12} , 15 d 频率稳定度为 1.2×10^{-11} [51-52]。

5 结语

中国科学院国家授时中心开展了原子喷泉钟的自主研制, 所研制的铯原子钟 NTSC-CsF2 和铷原子喷泉钟 NTSC-RbF1 已经应用于国家标准时间和国际原子时的产生和驾驭。目前, 限制原子喷泉钟频率稳定度和频率不确定性能的主要因素有: 本地振荡器的相位噪声、冷原子碰撞频移和腔相位分布频移。针对上述问题, 开展了液氮冷却微波谐振腔技术、低温蓝宝石振荡器技术和全光纤光学集成技术的研究, 以进一步提升原子喷泉钟的性能和应用范围, 满足国家标准时间产生、卫星导航系统和星网地面站、高精度光纤时频网的应用需求。

参考文献:

- [1] PANFILO G, ARIAS F. The Coordinated Universal Time (UTC)[J]. *Metrologia*, 2019, 56(4): 042001.
- [2] WHIBBERLEY P B, DAVIS J A, SHEMAR S L. Local representations of UTC in national laboratories [J]. *Metrologia*, 2011, 48: S154-S164.
- [3] PANFILO G, HARMEGNIES A, TISSERAND L. A new weighting procedure for UTC [J]. *Metrologia*, 2014, 51(6): 285-292.
- [4] YNANDS R W, WEYERS S. Atomic fountain clocks [J]. *Metrologia*, 2005, 42(3): S64-S79.
- [5] LEVI F, CALONICO D, CALOSSO C E, et al. Accuracy evaluation of ITCsF2: a nitrogen cooled caesium fountain [J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 270.
- [6] JALLAGEAS A, DEVENOGES L, PETERSEN M, et al. First uncertainty evaluation of the FoCS-2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2018, 55(3): 366.
- [7] FANG F, LI M S, LIN P W, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation [J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454.
- [8] SZYMANIEC K, PARK S E, MARRA G, et al. First accuracy evaluation of the NPL-CsF2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2010, 47(4): 363-376.
- [9] BEATTIE S, JIAN B, ALCOCK J, et al. First accuracy evaluation of the NRC-FCs2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2020, 57(3): 35010.
- [10] GERGINOV V, NEMITZ N, WEYERS S, et al. Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CSF2 [J]. *Metrologia*, 2010, 47(1): 65-79.
- [11] DOMNIN Y S, BARYSHEV V N, BOYKO A I, et al. The MTsR-F2 fountain-type cesium frequency standard [J]. *Measurement Techniques*, 2013, 55(10): 1155.
- [12] GUÉNA J, ABGRALL M, ROVERA D, et al. Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(3): 391.
- [13] ROVERA G D, BIZE S, CHUPIN B, et al. UTC(OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary [J]. *Metrologia*, 2016, 53(3): S81.
- [14] BAUCH A, WEYERS S, PIESTER D, et al. Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based time scale [J]. *Metrologia*, 2012, 49(3): 180.
- [15] TAKAMIZAWA A, YANAGIMACHI S, HAGIMOTO K, et al. First uncertainty evaluation of the cesium fountain primary frequency standard NMIJ-F2 [J]. *Metrologia*, 2022, 59(3): 035004.
- [16] WANG X L, RUAN J, LIU D D, et al. First evaluation of the primary frequency standard NTSC-CsF2 [J]. *Metrologia*, 2023, 60(6): 1-15.
- [17] GERGINOV V, HOTH G W, HEAVNER T P, et al. Accuracy evaluation of primary frequency standard NIST-F4 [J]. *Metrologia*, 2025, 62(3): 035002.
- [18] BLINOV I, BOIKO A, KOSHELIAEVSKII N, et al. First experiments on application of Rb fountain frequency standards for TA(SU) time scale maintenance [C]// 2018 European Frequency and Time Forum, Torino: IEEE, 2018.
- [19] PAVLENKO K Y, PAVLENKO Y K, BELYAEV A A, et al. Creation of the first Russian time and frequency standard on a fountain of ultracold rubidium atoms [J]. *Quantum Electronics*, 2018, 48(10): 967-972.
- [20] PEIL S, SWANSON T B, HANSEN J, et al. Microwave-clock timescale with instability on order of 10^{-17} [J]. *Metrologia*, 2017, 54(4): 247-252.
- [21] PEIL S, AKIN T G, WHALEN J D. 100 ns-level timing holdover after 12 years for rubidium atomic fountains [J]. *Physical Review Applied*, 2025, 24(2): 024014.
- [22] ZHANG H, RUAN J, LIU D D, et al. Development and preliminary operation of ^{87}Rb continuously running atomic fountain clock at NTSC [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2022, 71: 1008312.
- [23] SANTARELLI G, LAURENT P H, LEMONDE P. Quantum projection noise in an atomic fountain; a high

- stability cesium frequency standard[J]. *Physical Review Letter*, 1999, 82(3):4619-4622.
- [24] GUËNA P, ROSENBUSCH P, LAURENT M, et al. Demonstration of a dual alkali Rb/Cs fountain clock[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2010, 57(3):647.
- [25] DOBREV G D, GERGINOV V, WEYERS S. Loading a fountain clock with an enhanced low-velocity intense source of atoms[J]. *Physical Review A*, 2016, 93(4):043423.
- [26] 吴长江, 阮军, 陈江, 等. 应用于铯原子喷泉钟的二维磁光阱研制[J]. *物理学报*, 2013, 62(6):063201.
- [27] ZHENG F S, CHEN W L, LIU K, et al. Uncertainty evaluation of the caesium fountain primary frequency standard NIM6[J]. *Metrologia*, 2025, 62(3):3035005.
- [28] SZYMANIEC K, PARK S E. Primary frequency standard NPL-CsF2: optimized operation near the collisional shift cancellation point [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2011, 60(7):2475-2481.
- [29] CHAMBON D, LOURS M, CHAPELET F, et al. Design and metrological features of microwave synthesizers for atomic fountain frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, 54(4):729-735.
- [30] ABGRALL J, GUENA M, LOURS G, et al. High stability comparison of atomic fountains using two different cryogenic oscillators[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(6):1198-1203.
- [31] MILLO J, ABGRALL M, LOURS M, et al. Ultralow noise microwave generation with fiber-based optical frequency comb and application to atomic fountain clock [J]. *Applied Physics Letter*, 2009, 94(14):141105.
- [32] LIPPHARDT B, GROSCHE G, STERR U, et al. The stability of an optical clock laser transferred to the interrogation oscillator for a Cs fountain [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2009, 58(4):1258-1262.
- [33] LI R X, GIBBLE K. Phase variations in microwave cavities for atomic clocks[J]. *Metrologia*, 2004, 41(6):376-386.
- [34] LI R, GIBBLE K. Evaluating and minimizing distributed cavity phase errors in atomic clocks [J]. *Metrologia*, 2010, 47(5):534-551.
- [35] GUENA J, LI R X, GIBBLE K, et al. Evaluation of Doppler shifts to improve the accuracy of primary atomic fountain clocks [J]. *Physical Review Letter*, 2011, 106(13):130801.
- [36] WEYERS S, GERGINOV V, NEMITZ N, et al. Distributed cavity phase frequency shifts of the caesium fountain PTB-CSF2[J]. *Metrologia*, 2012, 49(2):82-87.
- [37] LIU R X, GIBBLE K, SZYMANIEC K. Improved accuracy of the NPL-CsF2 primary frequency standard; evaluation of distributed cavity phase and microwave lensing frequency shifts[J]. *Metrologia*, 2011, 48(3):283-289.
- [38] BURROWS K, HENDRICKS R J, SZYMANIEC K, et al. Measuring atom positions in a microwave cavity to evaluate distributed cavity phase shifts[J]. *Metrologia*, 2020, 57(6):065003.
- [39] BEATTIE S, JIAN B, MARCEAU C, et al. Advancements in the NRC-FCs2 primary frequency standard [J]. *Metrologia*, 2025, 62(3):035003.
- [40] KAZDA M, GERGINOV V, NEMITZ N, et al. Investigation of rapid adiabatic passage for controlling collisional frequency shifts in a caesium fountain clock[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation Measurement*, 2013, 62(10):2812-2819.
- [41] PEREIRA DOS SANTOS F, MARION H, BIZE S, et al. Controlling the cold collision shift in high precision atomic interferometry[J]. *Physical Review Letter*, 2002, 89(23):233004.
- [42] SHI J R, WANG X L, BAI Y, et al. Evaluation of second-order Zeeman frequency shift in NTSC-F2 [J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30(7):070601.
- [43] SZYMANIEC K, LEA S N, GIBBLE K, et al. NPL Cs fountain frequency standards and the quest for the ultimate accuracy [C]//*Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 723:012003.
- [44] WEYERS S, GERGINOV V, KAZDA M, et al. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks[J]. *Metrologia*, 2018, 55(6):789-805.
- [45] 刘昆, 房芳. 基准微波原子钟 [J]. *物理*, 2023, 52(7):441448.
- [46] 房芳, 张爱敏, 林弋戈, 等. 时间:天文时-原子秒-基于常数重新定义秒[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2021, 51(7):074208.
- [47] 魏荣, 李耀, 汪凌珂, 等. 冷原子微波频标的原理与发展 [J]. *中国激光*, 2024, 51(11):1101019.
- [48] 阮军, 王叶兵, 常宏, 等. 时间频率基准装置的研制现状[J]. *物理学报*, 2015, 64(16):160308.
- [49] YANG F, WANG X L, FAN S CH, et al. Development and tuning of the microwave resonant cavity of a cryogenic cesium atomic fountain clock[J]. *Review Scientific Instruments*, 2022, 93(4):044708.
- [50] 范思晨, 杨帆, 阮军. 蓝宝石谐振体内的回音壁模电磁场分布研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(23):234101.
- [51] BAI Y, RUAN J, LIU D D, et al. Frequency stabilization technology of 1 560 nm fiber laser based on rubidium modulation transfer spectroscopy [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(5):7101506.
- [52] BAI Y, RUAN J, ZHANG H, et al. Fiber laser system for Rb atomic fountain clock[J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 188:104043.